

Evaluación Del Comportamiento Hidromecánico De Materiales Granulares Marginales De  
Subbase Identificados Como MGM-4.

Ervin Javier Jaimes Celis y John Javier Cetina

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniería Civil

Director

Vladimir Ernesto Merchán Jaimes,

Ingeniero Civil, Ph.D.

Codirector

Allex Eduardo Alvarez Lugo,

Ingeniero Civil, Ph.D.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Ingeniería Civil

Bucaramanga

2022

## Tabla de Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	9
1. Objetivos .....	12
1.1 Objetivo General .....	12
1.2 Objetivos Específicos.....	12
2. Generalidades.....	13
2.1 Proyecto global de investigación en materiales granulares marginales (MGM) .....	13
3. Marco Teórico.....	14
3.1 Déficit de infraestructura vial asociado a falta de oportunidades y al conflicto armado .....	14
3.2 Aplicación de tecnologías y procesos constructivos innovadores para la optimización de recursos en las vías terciarias .....	15
3.3 Materiales granulares marginales (MGMs) .....	16
3.4 Succión.....	17
3.5 Técnica de papel de filtro.....	17
3.6 Degradación de agregados .....	18
3.7 Tracción indirecta .....	18
4. Metodología .....	19
4.1 Materiales usados en la composición de los MGMs.....	19
4.2 Determinación de granulometría.....	20
4.3 Determinación del índice de plasticidad .....	21
4.4 Curva de compactación.....	22
4.5 Ensayo de tracción indirecta .....	23

4.6 Toma de imágenes .....	23
4.7 Succión total.....	24
4.8 Granulometría final .....	26
5. Resultados .....	27
5.1 Granulometría de diseño .....	27
5.2 Índices de plasticidad .....	28
5.3 Compactación .....	30
5.4 Tracción indirecta .....	32
5.5 Toma de imágenes .....	36
5.6 Succión.....	37
5.7 Granulometría final.....	40
6. Conclusiones .....	42
7. Recomendaciones .....	44
Referencias Bibliográficas .....	45
Apéndices.....	48

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 <i>Características de los MGMs</i> .....	13
Tabla 2 <i>Curva de calibración para papel de filtro Whatman No. 42.</i> .....	26
Tabla 3 <i>Masa seca para una probeta MGM6.</i> .....	27
Tabla 4 <i>Masa seca para una probeta MGM9.</i> .....	28
Tabla 5 <i>Resultados de ensayos de IP de material de cantera, bentonita, y caolinita.</i> .....	28
Tabla 6 <i>Cantidades de cada material obtener un IP de 15%.</i> .....	29
Tabla 7 <i>Resistencia a la tracción indirecta para los materiales MGM6 y MGM9.</i> .....	35
Tabla 8 <i>Resistencia a la tracción indirecta para el material SBG_C1.</i> .....	35
Tabla 9 <i>Valores de parámetros necesarios para calcular el valor de succión para los materiales MGM-6 y MGM-9.</i> .....	37
Tabla 10 <i>Resultados medición de succión de los materiales MGM-6 y MGM-9.</i> .....	38
Tabla 11 <i>Resultados medición de succión del material SBG_C1.</i> .....	39

### Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1 <i>Densidad de la red terciaria y el índice de pobreza multidimensional</i> .....	14
Figura 2 <i>Índice de conflicto, 2022-2013</i> .....	15
Figura 3 <i>Esfuerzos de tracción horizontal en el ensayo de tracción indirecta</i> .....	19
Figura 4 <i>Curvas granulométricas MGMs y SBG-38</i> .....	21
Figura 5 <i>Índice de plasticidad vs bentonita (%)</i> .....	29
Figura 6 <i>Peso unitario seco vs número de giros para los materiales MGM6 y MGM9</i> .....	30
Figura 7 <i>Curvas de compactación para los materiales MGM6 y MGM9</i> .....	31
Figura 8 <i>Fuerza axial vs desplazamiento para los materiales MGM6 y MGM9</i> .....	33
Figura 9 <i>Fuerza axial vs desplazamiento para el material SBG_C1</i> .....	34
Figura 10 <i>Registro fotográfico para la probeta de material MGM9-C1</i> .....	36
Figura 11 <i>Relación humedad de probeta y contenido de humedad del papel de filtro</i> .....	39
Figura 12 <i>Curvas de retención de agua para los materiales MGM6 y MGM9</i> .....	40
Figura 13 <i>Granulometría inicial y final del material MGM6</i> .....	41
Figura 14 <i>Granulometría inicial y final del material MGM9</i> .....	41

**Lista de Apéndices**

	<b>pág.</b>
Apéndice A. Registro fotográfico realizado durante el desarrollo del proyecto.....	48
Apéndice B. Protocolo de ensayo de tracción indirecta .....	56
Apéndice C. Video ensayo de tracción indirecta. ....	61
Apéndice D. Video tiempos de mezclado.....	61

## Resumen

**Título:** Evaluación del comportamiento hidromecánico de materiales granulares marginales de subbase identificados como MGM-4.\*

**Autores:** Ervin Javier Jaimes Celis y John Javier Cetina\*\*

**Palabras Clave:** Material granular marginal, Compactación, Resistencia a tracción indirecta, granulometría, Succión, Material fino.

### Descripción:

En este proyecto se estudian experimentalmente las propiedades hidro-mecánicas de dos materiales granulares marginales (MGMs). Los MGMs de estudio se diseñaron y produjeron a partir de las especificaciones de una subbase granular SBG-38 especificada por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), a la cual se le modificó el contenido de material pasa tamiz No. 200 con el fin de superar el límite permitido por el INVIAS. Adicionalmente, se planteó en la investigación trabajar con un índice de plasticidad de 15% para sobrepasar la especificación INVIAS respectiva (6%); esto se logró creando una dosificación de materiales finos (bentonita, caolinita, y material de cantera). Después, por medio del compactador giratorio fue posible obtener curvas de compactación y con estas la humedad óptima y el peso unitario seco máximo para cada MGM. Seguidamente, para determinar el comportamiento hidro-mecánico de las probetas usadas para obtener las curvas de compactación, se les realizaron ensayos de resistencia a la tracción indirecta, succión total, y granulometría. Fue posible establecer que para el MGM6 la resistencia a la tracción disminuye a medida que aumenta el contenido de humedad de compactación y para el MGM9 no evidencia una tendencia clara; igualmente, se estableció la influencia del material fino (pasa tamiz No. 200) en la curva de retención de agua, donde se evidenció que, a mayor contenido de estos, se desarrollan succiones más altas. Finalmente, se mostró que la degradación de los MGMs por efecto de la técnica de compactación giratoria es similar en todas las probetas evaluadas.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Ingeniería Civil. Director: Vladimir Ernesto Merchán Jaimes. Ingeniero Civil. Ph.D.. Codirector: Alex Eduardo Alvarez Lugo. Ingeniero Civil. Ph.D.

### Abstract

**Title:** Evaluation of the hydromechanical behavior of subbase marginal granular materials identified as MGM-4.\*

**Author(s):** Ervin Javier Jaimes Celis y John Javier Cetina \*\*

**Key Words:** Marginal granular material, Compaction, Indirect tensile strength, Gradation, suction, Fine material.

### Description:

In this project, the hydro-mechanical properties of two marginal granular materials (MGMs) are studied experimentally. The MGMs under study were designed and produced based on the specifications of a granular subbase SBG 38 specified by the National Roads Institute (INVIAS), to which the content of material passing sieve No. 200 was modified to exceed the specification issued by INVIAS. In addition, it was proposed to work with a plasticity index of 15% to exceed the INVIAS' specification (6%). This index was achieved by combining fine materials (bentonite, kaolinite, and quarry material). Then, employing the gyratory compactor, it was possible to obtain compaction curves to determine the optimum moisture content and the maximum dry unit weight for each MGM. Next, to determine the hydro-mechanical behavior of the specimens used to obtain the compaction curves, indirect tensile strength, total suction, and gradation tests were performed. Results suggest that for MGM6, the tensile strength decreases as the compaction moisture content increases, while for the MGM9, there is no clear trend. Likewise, the influence of the fine material (i.e., passing sieve No. 200) on the water retention curve was established. It was shown that the higher the fine material content, the higher the suction developed. Finally, the results suggest that the MGMs' degradation due to the effect of the gyratory compaction technique was similar in all the specimens.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Civil Engineering. Civil Engineering. Director: Vladimir Ernesto Merchán Jaimes. Civil engineer. Ph.D. Co-director: Alex Eduardo Alvarez Lugo. Civil engineer. Ph.D.

## Introducción

La infraestructura vial es importante para el desarrollo del país, pues está directamente relacionada con la economía y la comunicación de las zonas del territorio nacional. Esta infraestructura la integran vías primarias, secundarias, y terciarias, las cuales están a cargo del Ministerio de Transporte a través del Instituto Nacional de Vías (INVIAS), los departamentos, y los municipios.

La red vial terciaria es uno de los tipos de infraestructura, junto con las áreas de riego, electrificación, y conectividad considerados esenciales para el desarrollo social y la productividad de las regiones. El desarrollo y adecuación de esta infraestructura debe tener en cuenta el tipo de cadena productiva identificada. Por ejemplo, permitir la reducción de los costos de producción agrícola, acopio, transporte y distribución, así como la entrada de turistas y dotaciones en áreas antes inaccesibles. La acción articulada de los componentes de los planes regionales sectoriales genera un despertar maravilloso en las regiones (DNP, 2020).

De esta forma, se identifica un vínculo entre la necesidad de infraestructura de transporte, el conflicto, y la pobreza. Se debe tener en cuenta que la expansión de la infraestructura mejora la economía (Correa, 2017). Estudios realizados afirman que al aumentar el 1 % en la inversión en infraestructura vial, el incremento de la economía en las regiones equivale a un 0.42 % (Correa, 2017).

Asimismo, en el estudio elaborado por Sánchez (CONPES, 2016) se encuentra que una mejora en la red vial incrementa la velocidad de desplazamiento del hogar a cerca de 12 km/h. Esto se vio reflejado en un aumento de 9.6% en el ingreso y 8.9% en el consumo de los hogares rurales, así como en la posibilidad de reemplazar los niveles de autoconsumo por consumo

comprado y de fortalecer la especialización en los hogares agrícolas. Sánchez CONPES (2016) muestra que estos incrementos reducen los niveles de pobreza en 2.2 puntos porcentuales anualmente.

En Colombia la red vial está conformada en un 67% por vías terciarias, que corresponde a una extensión aproximada de 142.284 km, de los cuales 27.577 km están a cargo del INVIAS, 100.748 km a cargo de municipios, y 13.959 km a cargo de los departamentos (Correa, 2017).

En la actualidad, un porcentaje elevado de estas vías se encuentran en mal estado, con dificultades para la movilidad o simplemente no se pueden transitar; esto como efecto del poco o, en algunos casos, nulo mantenimiento por parte de las entidades encargadas. Estas carencias afectan el traslado de pacientes a hospitales y centros de salud, la presencia de estudiantes en colegios y universidades, y la pérdida y sobre costo de productos comercializados en las regiones. En razón de lo anterior, es necesario contar con vías adecuadas que permitan de forma idónea la movilidad de la comunidad entre las diferentes zonas rurales (DNP, 2020).

No obstante, debido al bajo flujo vehicular que circula por este tipo de vías, al número reducido de personas beneficiarias, las condiciones climáticas, el costo elevado de mantenimiento, y a la dificultad de obtención y transporte de materiales que cumplan con las especificaciones mínimas de calidad impuestas por el INVIAS, se hace necesario encontrar nuevas alternativas para la intervención de estas vías. Una de ellas es la utilización de los recursos naturales disponibles localmente, que pueden incluir materiales granulares marginales (MGMs). Se considerarán como tales los materiales que no se clasifican como suelos seleccionados, ni adecuados, ni tolerables, por el incumplimiento de alguna de las especificaciones indicadas para estos (Pretel, 2002). Dentro de dichos materiales se encuentran los suelos colapsables, suelos expansivos, suelos con yesos,

suelos con otras sales solubles y suelos con materia orgánica (Cano, 2015), igualmente residuos y subproductos industriales.

Teniendo en cuenta los aspectos mencionados y que, en la actualidad, no existen muchos estudios referentes a la implementación de MGMs, en el presente trabajo de grado el grupo identificado como MGM-4, se plantea evaluar de forma experimental el comportamiento hidromecánico de dos tipologías de MGMs identificados como MGM6 y MGM9, los cuales presentan índice de plasticidad (IP) de 15% y contenidos de finos de 21% y 24%, respectivamente. Este trabajo de grado se inscribe en las actividades de investigación de un proyecto de investigación global, el cual estudia la implementación de los MGMs para capas de subbase de vías terciarias.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Evaluar el comportamiento hidromecánico de muestras compactadas con materiales granulares marginales MGM-4, teniendo en cuenta un contenido de finos de 21% y 24% e Índice de plasticidad de 15%.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Establecer las curvas de compactación de los materiales granulares teniendo en cuenta un contenido de finos del 21% y 24% e índice de plasticidad de 15% (MGM-4).

Establecer la relación succión total-contenido de agua-grado de saturación de las muestras compactadas.

Evaluar el grado de degradación del tamaño de partículas por efectos de la técnica de compactación giratoria mediante la comparación de la granulometría de diseño de las muestras y después de compactar.

Evaluar la influencia del contenido de humedad de compactación sobre resistencia a la tracción indirecta (TSI) en las muestras granulares identificadas como MGM-4.

## 2. Generalidades

### 2.1 Proyecto global de investigación en materiales granulares marginales (MGM)

El proyecto general incluye diferentes MGMs, cuyas características se presentan en la tabla 1. Como se aprecia en la tabla 1, los MGMs se discriminan por su contenido de finos (18% a 24%) y sus índices de plasticidad (8% a 15%); además, se cuenta con una subbase granular de control (SBG-C1) que contiene 8% de finos e índice de plasticidad 0%, cumpliendo así las especificaciones dadas por el INVIAS para estos parámetros, que establecen un máximo contenido de finos de 15% y un índice de plasticidad máximo de 6% (INVIAS, 2013). Este artículo se enfocará en el estudio de los MGM-4 (MGM6 y MGM9).

**Tabla 1**

*Características de los MGMs*

<b>Grupo</b>	<b>Material</b>	<b>Finos (%)</b>	<b>IP (%)</b>
MGM-1	MGM1	18	8
MGM-1	MGM2	18	12
MGM-3	MGM3	18	15
MGM-2	MGM4	21	8
MGM-2	MGM5	21	12
MGM-4	MGM6	21	15
MGM-5	MGM7	24	8
MGM-5	MGM8	24	12
MGM-4	MGM9	24	15
MGM-3	SBG_C1	8.5	0

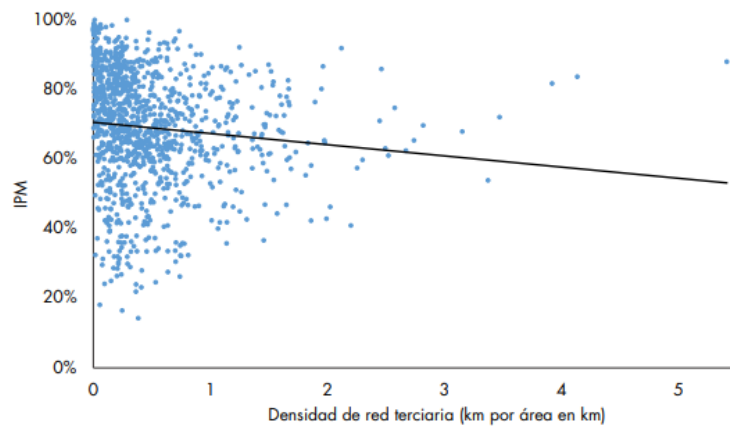
### 3. Marco Teórico

#### 3.1 Déficit de infraestructura vial asociado a falta de oportunidades y al conflicto armado

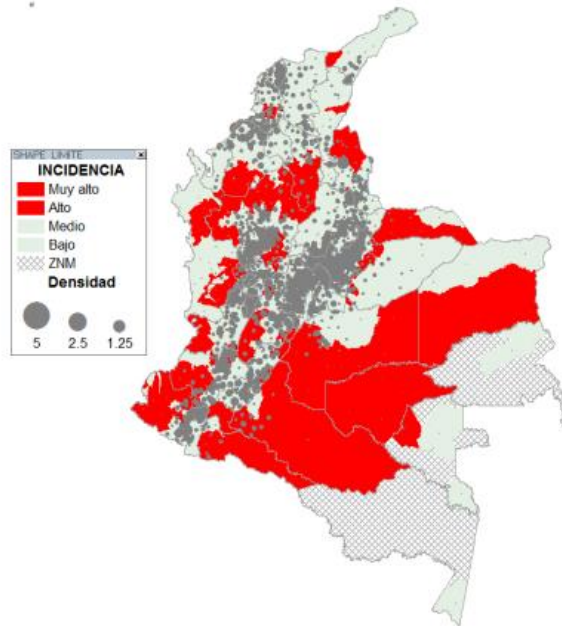
La red vial aporta sustancialmente al desarrollo del sector rural del país. La falta de provisión o la baja calidad de la infraestructura de transporte afecta directamente la comunicación entre los territorios, problema que se encuentra fuertemente vinculado con los indicadores de pobreza. En la figura 1, se observa la relación inversa existente entre la densidad de red terciaria y el índice de pobreza multidimensional (CONPES, 2016). Se observa que los municipios con mayores densidades de vías terciarias, sin considerar el estado de estas, tienden a tener menores tasas de incidencia de la pobreza (CONPES, 2016).

#### Figura 1

*Densidad de la red terciaria y el índice de pobreza multidimensional.*



Además, un mayor déficit de infraestructura vial está asociado a una mayor presencia del conflicto armado en la región. Esto se puede apreciar en la figura 2, que muestra indicadores de densidad vial y de conflictividad, desarrollados por el grupo de proyectos especiales del Departamento Nacional de Planeación (DNP) (CONPES, 2016).

**Figura 2***Índice de conflicto, 2022-2013*

Nota. Tomado del Grupo de proyectos especiales del DNP, 2015.

Este entorno muestra que parte importante de los conflictos armados internos se desarrollan en zonas con insuficiente infraestructura vial, lo cual no únicamente ha retrasado su integración económica y social, sino que también incentiva el accionar de los grupos armados ilegales (CONPES, 2016).

### **3.2 Aplicación de tecnologías y procesos constructivos innovadores para la optimización de recursos en las vías terciarias**

Las vías terciarias son aquellas que conectan las cabeceras municipales con sus veredas o conectan las veredas entre sí. Las carreteras consideradas como terciarias pueden funcionar en afirmado y en caso de pavimentarse deberán cumplir con las condiciones geométricas estipuladas para las vías secundarias (INVIAS, 2008).

Si bien la red terciaria está compuesta por senderos de bajos volúmenes de tránsito, una gran parte de estos pueden corresponder a vehículos pesados. Por lo tanto, las soluciones de ingeniería deben buscar dos condiciones en las construcciones propuestas: menores costos en la intervención adelantada en relación con los costos generados por obras ejecutadas tradicionalmente y factibilidad técnica (CONPES, 2016).

Cuando se quiere lograr una carretera transitable, a menudo se presentan diversos obstáculos, los más frecuentes son:

- Suelos de mala calidad.
- Escasez de materiales adecuados para construir estructuras de pavimento.
- Condiciones climáticas extremas sumadas a dificultades topográficas.
- Aguas subterráneas y superficiales de difícil manejo.

Cuando estos obstáculos se presentan, la solución de ingeniería debe apuntar a analizar la implementación de materiales existentes en la región, las diversas técnicas para la estabilización de suelos, el mejoramiento de los materiales disponibles, y el aumento de la calidad de superficie de rodadura de las vías (CONPES, 2016).

### **3.3 Materiales granulares marginales (MGMs)**

En este trabajo se definen como aquellos suelos que no cumplen con las especificaciones definidas por la normativa de una agencia vial para conformar capas estructurales de pavimentos. En el artículo 330.3.3 de la norma española PG-3 (PreteI, 2002), los suelos se clasifican en cinco grupos (seleccionados, adecuados, tolerables, marginales, e inadecuados); esta clasificación inicia desde los suelos con mejores características hasta los de menor calidad. Por otra parte, en la normativa nacional INVIAS (INVIAS, 2013) no se consideran los materiales marginales como un tipo específico de materiales, ya que estos hacen parte de los suelos inadecuados. Los suelos

marginales podrán utilizarse en algunas zonas, siempre que su uso se justifique mediante un estudio especial, aprobado por el director de las obras.

### **3.4 Succión**

La succión se define como la energía requerida para remover una molécula de agua de la matriz de suelo por medio de la evaporación (Meza y Victoria, 2012). Esta tiene dos componentes, una relacionada con el efecto de la capilaridad, denominada succión matricial ( $\Psi_m$ ) y una componente correspondiente a la presencia de sales disueltas en el agua, llamada succión osmótica ( $\pi$ ). La succión matricial equivale a la diferencia entre la presión del agua y la presión del aire en los poros ( $u_a - u_w$ ). La succión total se expresa como la suma algebraica de las componentes matricial y osmótica. En ingeniería geotécnica, la succión se expresa en unidades de presión, Kilopascales (kPa) en el sistema internacional de unidades (SI) (Meza y Victoria, 2012).

### **3.5 Técnica de papel de filtro**

La determinación de la succión se realiza indirectamente, a través del agua absorbida, utilizando papeles de filtro especiales y tablas de calibración preparadas. Para que esto suceda correctamente, se debe generar un “microclima” en un recipiente que contenga el papel filtro y la muestra de suelo. Se debe permitir una cierta cantidad de tiempo para que el sistema alcance el equilibrio completo (Umbarila, s.f).

El papel de filtro y el suelo pueden o no estar en contacto, en el primer caso se determina la succión matricial. El papel de filtro absorbe agua y las sales minerales presentes en el agua del suelo también se mueven con el agua hacia el papel filtro, y no hay gradiente osmótico entre dos puntos de la masa del suelo. Si los materiales se separan entre sí, la humedad se transfiere por medio del vapor de agua y se puede medir la succión total. Este procedimiento es más delicado y

es necesario asegurarse de que el papel y el suelo en el contenedor estén efectivamente separados y que este intercambio de vapor pueda tener lugar (Umbarila, s.f).

### **3.6 Degradación de agregados**

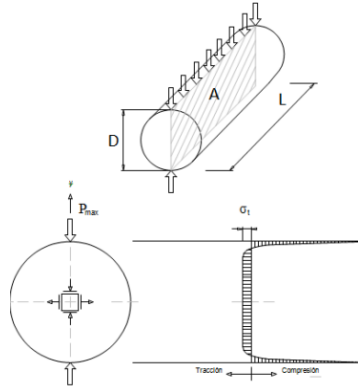
La degradación de agregados corresponde a la facturación de partículas mediante la aplicación de cargas de magnitud suficiente para romper las cadenas generadas por la propia compactación; este fenómeno conlleva a modificaciones en la morfología de las partículas y en su distribución granulométrica. La degradación de agregados se puede manifestar en suelos granulares y es amplificada por la angularidad, la composición mineralógica, la relación de vacíos, y la presencia de agua, entre otros (Batista, 2013).

### **3.7 Tracción indirecta**

El ensayo de tracción indirecta o ensayo brasileño se basa en comprimir diametralmente una probeta cilíndrica, implementando carga uniforme a lo largo de una línea o generatriz, hasta alcanzar su rotura (Neville, 1996). Este método experimental es muy usado para medir la resistencia a tracción del hormigón, pero, en esta investigación se utilizó en probetas fabricadas a partir de materiales MGMs, siguiendo los lineamientos de la norma de ensayo NLT-346/90 (NLT, 1990). En la figura 3, se observan las distribuciones teóricas de los esfuerzos a lo largo del eje horizontal para una carga centrada.

**Figura 3**

*Esfuerzos de tracción horizontal en el ensayo de tracción indirecta.*

**4. Metodología**

En este trabajo se evalúan los materiales del grupo MGM-4 los cuales se identifican como MGM6 y MGM9, estos se diseñaron y controlaron en laboratorio a partir de un material granular. Tomando como base de trabajo este material, se produjeron los dos MGMs con IP de 15% y contenido de finos de 21% y 24%.

Para cada MGM estudiado se determinó su curva de compactación. Las probetas empleadas para generar la curva de compactación fueron sometidas al ensayo de tracción indirecta (ITS) y una vez realizado dicho ensayo, se midió la succión total, y se determinó la granulometría final del material. Durante todo el proceso se llevó un registro de imágenes.

**4.1 Materiales usados en la composición de los MGMs**

Para la conformación de cada uno de los MGMs fue necesario utilizar diferentes materiales, iniciando por el material de cantera, el cual presenta un IP de 11% en su fracción fina (pasa tamiz No. 200). A su vez el material de cantera tiene un valor de desgaste en la máquina de los Ángeles

de 60.7%, pérdida por sulfatos de 3.70% y un equivalente de arena de 48% (Gelves, 2022). Este material fue obtenido de la cantera Paviandi, ubicada en el Km 4.5 vía Piedecuesta-Aratoca, Santander.

Nota 1. El valor de DMA del material granular de cantera es superior al máximo admisible para una subbase granular de tránsito bajo, si bien, no cumple con la especificación dada por el INVIAS (50%), se adoptó como material de control desde el punto de vista de que este material satisface las especificaciones INVIAS para la plasticidad (6%) y el contenido de finos (15%). En investigación futura se caracteriza material de control de tal forma que cumpla a cabalidad las especificaciones dadas por el INVIAS.

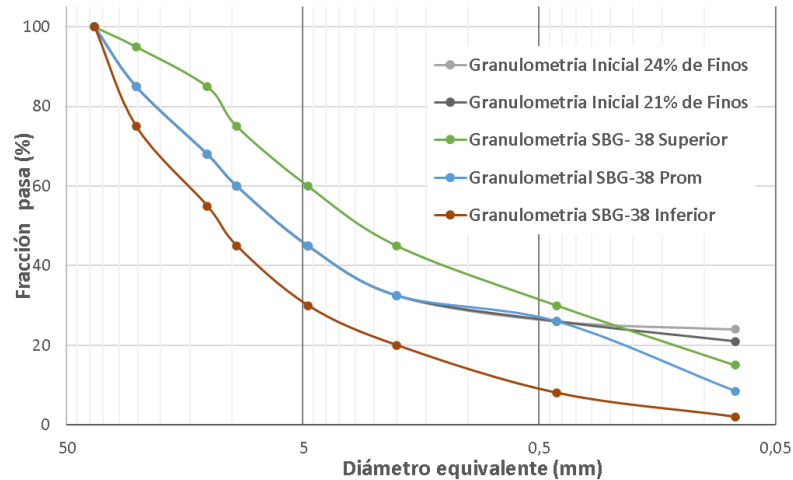
Para alcanzar el IP deseado en los MGMs, fue necesario emplear otros materiales, incluyendo caolinita y bentonita con IP de 11.7% y 360% respectivamente, los cuales fueron adquiridos a la empresa Comercial Fox S.A.S. ubicada en la vía Mosquera-Soacha, Cundinamarca.

#### **4.2 Determinación de granulometría**

Para la determinación de la granulometría de trabajo se tomó como base la curva granulométrica promedio especificada por el INVIAS para una subbase granular SBG-38 (INVIAS, 2013), a la cual se le modificó el contenido de finos a 21% y 24%, excediendo así el máximo porcentaje permitido (15%). En la figura 4, se presenta la curva granulométrica de trabajo y su variación respecto a la SBG-38. Igualmente, se elevó a 15% el IP, siendo este superior al máximo establecido en el artículo 320 de INVIAS (6%) (INVIAS, 2013). De esta manera, se tiene la configuración para los dos materiales de estudio MGM6 y MGM9.

**Figura 4**

*Curvas granulométricas MGMs y SBG-38.*



Con la granulometría definida para cada MGM, se fabricaron las probetas necesarias para el desarrollo del proyecto. Estas fueron fabricadas en un molde de 0.15 m de diámetro; su altura se estima en aproximadamente 0.20 m y peso unitario seco proyectado de 20 kN/m<sup>3</sup>.

#### 4.3 Determinación del índice de plasticidad

Para lograr el IP deseado (15%), se realizaron ensayos de límite líquido (norma INV-E 125-13) y límite plástico (norma INV-E 126-13). Dichos ensayos se llevaron a cabo con fracción fina de material de cantera, bentonita, y caolinita. Fue necesario realizar estos ensayos para diferentes combinaciones—proporciones—de los materiales antes indicados. De esta forma, se generó una curva de tendencia y se calcularon las proporciones necesarias de cada material para lograr el IP de 15%. Para que los materiales absorbieran el agua de forma homogénea, en el ensayo de límite líquido se permitió un tiempo de curado de 60 minutos para cada medición.

#### 4.4 Curva de compactación

Para establecer la curva de compactación de cada MGM se fabricaron probetas con humedades cercanas a la que se espera como óptima; la compactación de estas probetas se llevó a cabo empleando el compactador giratorio Superpave. Para garantizar que la humedad en el material granular antes de mezclado fuese de 0% se llevó a secado en horno durante un periodo de tiempo de 18 a 24 horas a temperatura de  $110\pm 5$  °C. Posteriormente, con el fin de generar una mezcla con humedad inicial homogénea, una vez realizada la mezcla del material seco y agua, se permitió un tiempo de curado de 18 a 24 horas, en bolsas herméticas.

Para determinar la humedad real de la mezcla se tomó una muestra representativa (200 g) una vez terminado el tiempo de curado, se llevó a secado de 12 a 16 horas a temperatura de  $110\pm 5$ °C. El material necesario para generar una probeta se divide en tres partes iguales; cada fracción se adiciona al molde procurando de esta forma minimizar la segregación. Las probetas fueron compactadas empleando el compactador giratorio, en el cual se especificó un ángulo de giro de  $1.25^\circ$  y una presión de contacto de 600 kPa. Para conseguir el parámetro de locking point (primeros tres giros que conducen a una altura constante que están precedidos por dos giros que conducen a una altura constante de un espécimen compactado en el compactador giratorio) (Mora y Espinosa, 2018), el número de giros para la compactación varía dependiendo de la humedad presente en la probeta: 180 giros para humedades extremas y 140 para las humedades centrales consideradas para la determinación de la curva de compactación de cada material. Una vez terminada la compactación, se extrajo la probeta, se recubrió con papel vinipel, y se almacenó en una cava con el fin de conservar su humedad.

#### **4.5 Ensayo de tracción indirecta**

Con el objetivo de determinar la resistencia a la tracción indirecta de las probetas elaboradas para generar la curva de compactación de cada MGM, se realizó el ensayo de tracción indirecta basado en la norma ASTM D8225 (Pérez et al, 2014). Para la aplicación de la carga se utilizó una prensa MTS-647 a la cual se acopló un cabezal de carga diseñado y construido específicamente para el tamaño de probeta utilizada. Una vez acoplado el cabezal a la prensa MTS 647, se ubicó la probeta sobre los elementos transmisores de carga del cabezal asegurándose que estuviese totalmente centrada y se ubicaron los tubos de PVC de recolección de muestras (de tal forma que el material caiga sobre estos una vez falle la probeta).

Se aplicó carga a la probeta manteniendo una velocidad de deformación constante de 50,8 mm/min, hasta que esta falló. El material recolectado en los tubos de PVC fue usado posteriormente en ensayos de succión total, granulometría final, y toma de imágenes.

#### **4.6 Toma de imágenes**

Para obtener las imágenes se ejecutaron tres fases; en las dos primeras se tomaron imágenes 2D con la ayuda de una cámara de 20.1 megapíxeles y en la tercera fase se tomaron imágenes 3D utilizando un Kinect de Xbox 360 y el software SDK versión 1.8 (Microsoft, s.f).

La primera fase se realizó en las condiciones que se encontraba la probeta compactada antes de realizar el ensayo de tracción indirecta, donde se ubicó la probeta a una distancia de 0.16 m desde el lente de la cámara y se tomaron dos imágenes correspondientes a la vista superior y frontal. Con el fin de mejorar la calidad de la imagen, se iluminó la probeta compactada con una luz blanca LED y se instaló un fondo negro.

Las dos siguientes fases se ejecutaron una vez término el ensayo de tracción indirecta. Para la segunda fase se ubicó la probeta a una distancia de 0.16 m de la cámara y se tomó una imagen

a cada una de las dos superficies de falla; en estas también se iluminó la probeta con una luz blanca LED y se instaló un fondo negro. Finalmente, en la última fase se tomaron imágenes 3D correspondientes a las dos superficies de falla de la probeta mediante un Kinect de Xbox 360, el cual se ubicó a una distancia de 0.68 m y fue controlado por el software SDK versión 1.8 (Microsoft, s.f).

#### **4.7 Succión total**

Para determinar la succión total del suelo se siguieron los lineamientos estipulados en la norma de ensayo INV E-159-13 (INVIAS, 2013). El ensayo se ejecutó sobre una fracción con masa de 200 a 400 g extraída de la probeta una vez terminado el ensayo de tracción indirecta. Para garantizar una humedad inicial de 0% en el papel de filtro, este fue secado durante 16 a 24 horas a temperatura de 110 °C para después almacenarlo en una bolsa hermética, garantizando que no recibiera humedad.

Con el objetivo de que el papel filtro no esté en contacto con la muestra, este se colocó en medio de dos discos de acrílico cuyas dimensiones son 6 cm de diámetro y 0.5 cm de espesor, uno de ellos con perforaciones que permiten la transferencia de humedad al papel filtro por medio de vapor de agua. Una vez extraída la fracción de muestra y conocida su masa, se colocó junto con el papel filtro en un recipiente hermético, asegurando que el acrílico perforado estuviese en contacto con la muestra. El tiempo para que haya un equilibrio completo fue fijado en aproximadamente 7 días; después de este tiempo, se extrajo el papel filtro y se colocó en una bolsa hermética. Para determinar el contenido de humedad que absorbió el papel de filtro, fue necesario conocer su masa al completar el periodo de equilibrio y la masa que presentaba el papel una vez secado durante dos horas a una temperatura de 110°C.

Con el fin de encontrar el contenido de agua del papel de filtro y así determinar la succión de cada MGM, se determinó la masa del papel de filtro seco y el contenido de humedad presente en el papel de filtro húmedo mediante las ecuaciones 1 y 2.

$$M_f = M_2 - T_h \quad (Ec. 1)$$

Donde

$M_f(g)$  = Masa de papel de filtro seco

$M_2(g)$  = Masa total seca

$T_h(g)$  = Masa de bolsa hermética, usada con el papel de filtro seco

$$M_w = M_1 - M_2 + T_h - T_c \quad (Ec. 2)$$

Donde

$M_w(g)$ : Masa de agua en el papel de filtro

$M_1(g)$ : Masa total humedad

$M_2(g)$ : Masa total seca

$T_c(g)$ : Masa de bolsa hermética, usada con el papel de filtro húmedo

Una vez se obtienen estos datos, con la ecuación 3 se calcula la humedad del papel de filtro.

$$W_f = \frac{M_w}{M_f} \times 100 \quad (Ec. 3)$$

Donde

$W_f(\%)$ : Contenido de agua papel de filtro

$M_f(\%)$ : Masa del papel de filtro seco

$M_w(g)$ : Masa de agua en el papel de filtro

Con la curva de calibración del papel filtro Whatman No. 42 (ASTM D5298 – 10) y el porcentaje de humedad presente en el papel ( $W_f$ ) se halló el valor de succión total con la ecuación 4.

$$h = (m \times W_f) + b \quad (Ec. 4)$$

Donde

h: Valor de succión

m ( $\log_{10}$  kPa/%): Pendiente curva de calibración.

b ( $\log_{10}$  kPa/%): Ordenada al origen de la curva de calibración

Los valores de m y b varían respecto a la humedad y se muestran en la tabla 2.

**Tabla 2**

*Curva de calibración para papel de filtro Whatman No. 42.*

<b>Humedad</b>	<b>m</b>	<b>b</b>
<45.3	-0.0779	5.3270
>45.3	-0.0135	2.4120

#### **4.8 Granulometría final**

Para establecer una comparación entre las granulometrías inicial y final, fue necesario evaluar el material de la probeta usada en el ensayo de tracción indirecta. Cabe aclarar que la masa no está en su totalidad, ya que se ha tomado una fracción para la medición de succión. Se observó que en las gravas y arenas se encontraban finos adheridos, por lo cual, para garantizar la remoción de la totalidad de estos, se optó por lavado; posteriormente, se secó en horno el material durante 24 horas.

Para la separación de los diferentes tamaños de partículas, se emplearon los mismos tamices utilizados en la granulometría de trabajo. El tamizado se realizó mecánicamente con una masa de 500 g cada vez y una duración de vibración de cinco minutos; seguida

## 5. Resultados

### 5.1 Granulometría de diseño

En las tablas 3 y 4 se presenta la masa seca total necesaria para elaborar una probeta de los materiales MGM6 y MGM9, respectivamente, y la distribución de tamaños de partículas. La diferencia entre las granulometrías es la masa de finos; por ello, también hay una variación en la fracción retenida en el tamiz No. 200. Debido a que las granulometrías están basadas en la subbase tipo SBG-38, las demás fracciones son iguales.

**Tabla 3**

*Masa seca para una probeta MGM6.*

Malla N°	Pasa (%)	Retenido Acumulado (%)	Retenido (%)	Masa (g)
1 1/2"	100,0	0,0	0,0	0
1"	85,0	15,0	15,0	1090
1/2"	68,0	32,0	17,0	1236
3/8"	60,0	40,0	8,0	582
N°4	45,0	55,0	15,0	1090
N°10	32,5	67,5	12,5	909
N°40	26,0	74,0	6,5	472
N°200	21,0	79,0	5,0	363
Finos	0,0	100,0	21,0	1526
Total	--	--	100,0	7269

**Tabla 4**

*Masa seca para una probeta MGM9.*

Malla N°	Pasa (%)	Retenido Acumulado (%)	Retenido (%)	Masa (g)
1 1/2"	100,0	0,0	0,0	0
1"	85,0	15,0	15,0	1090
1/2"	68,0	32,0	17,0	1236
3/8"	60,0	40,0	8,0	582
N°4	45,0	55,0	15,0	1090
N°10	32,5	67,5	12,5	909
N°40	26,0	74,0	6,5	472
N°200	24,0	76,0	2,0	145
Finos	0,0	100,0	24,0	1745
<b>Total</b>	--	--	100,0	<b>7269</b>

## 5.2 Índices de plasticidad

En la tabla 5, se presentan los resultados de los ensayos de límite líquido y límite plástico realizados a las diferentes mezclas definidas con el objetivo de obtener una curva de tendencia y así poder establecer el porcentaje de cada material necesario en la obtención de un IP de 15%. En la figura 5, se muestra la relación entre el contenido de bentonita y el IP, realizada a partir de los datos de la tabla 5.

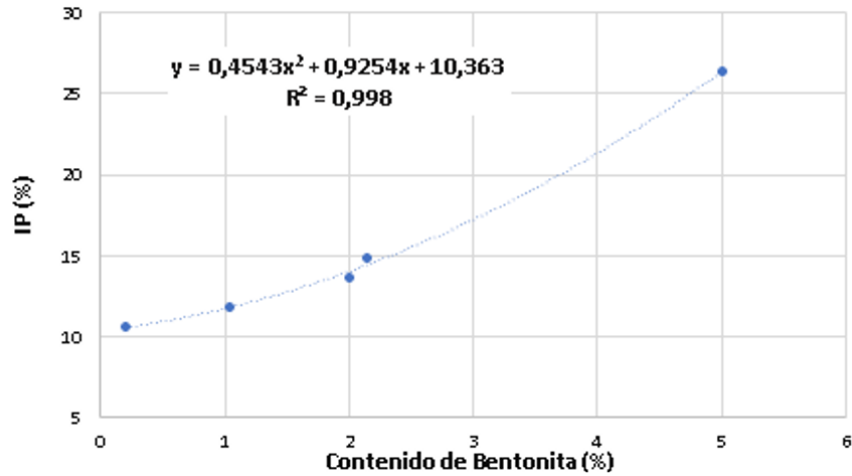
**Tabla 5**

*Resultados de ensayos de IP de material de cantera, bentonita, y caolinita.*

Contenido de Bentonita (%)	Contenido de Cantera (%)	Contenido de Caolinita (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
0.20	49.90	49.90	39.75	29.17	10.58
1.04	49.48	49.48	39.97	28.15	11.83
2.00	49.00	49.00	42.99	29.37	13.62
2.15	48.93	48.93	44.34	29.49	14.85
5.00	47.50	47.50	53.56	27.22	26.34

**Figura 5**

*Índice de plasticidad vs bentonita (%).*



Para la obtención del porcentaje de bentonita necesaria para alcanzar un IP de 15%, se usó la ecuación de la figura 5. Se adoptó igual cantidad de material de cantera y de caolinita.

$$IP = 0.4543 * X^2 + 0.9254 * X + 10.363 \quad [2]$$

Donde:

IP = índice de plasticidad

X = cantidad de bentonita (%)

En la tabla 6, se presentan las proporciones requeridas de fracción fina de cada material para obtener un IP de 15%.

**Tabla 6**

*Cantidades de cada material obtener un IP de 15%.*

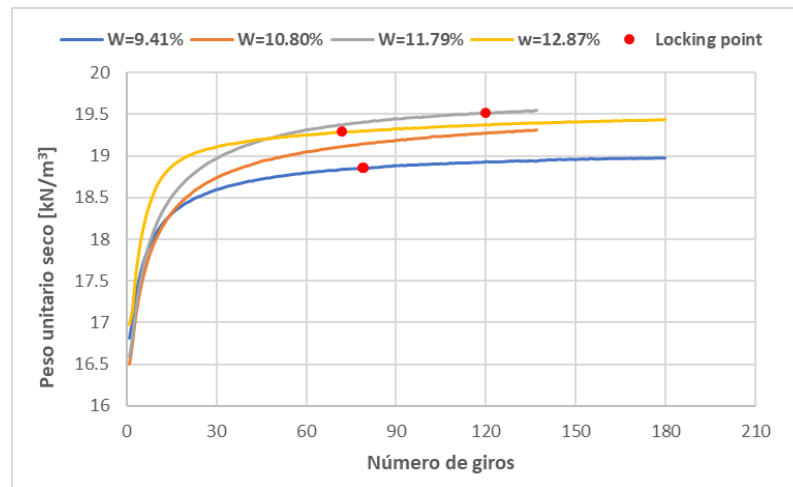
IP (%)	Cantidad Bentonita (%)	Cantidad Cantera (%)	Cantidad caolinita (%)
15	2.34	48.83	48.83

### 5.3 Compactación

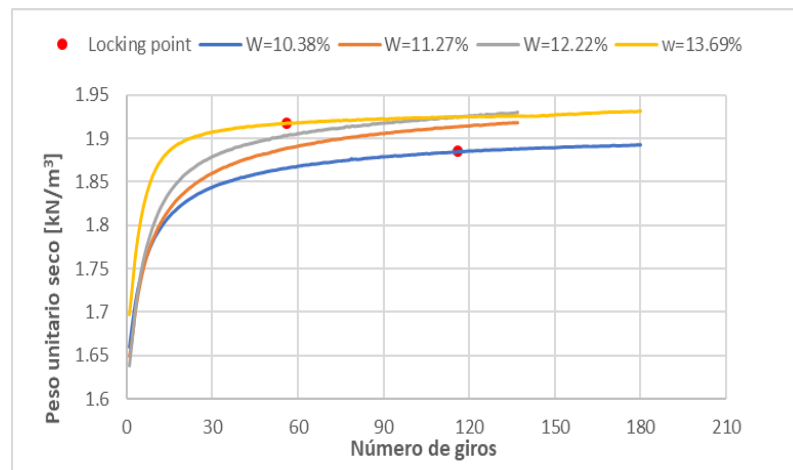
En la figura 6 se muestran los resultados obtenidos del proceso de compactación de los materiales MGM6 y MGM9, en la que se compara peso unitario seco y el número de giros aplicados. Adicionalmente, se evidencia el locking point en caso de presentarse. En los casos donde no se obtuvo, es debido a que este se presenta a un número de giros mayor al aplicado.

**Figura 6**

*Peso unitario seco vs número de giros para los materiales MGM6 y MGM9.*



(a) MGM6



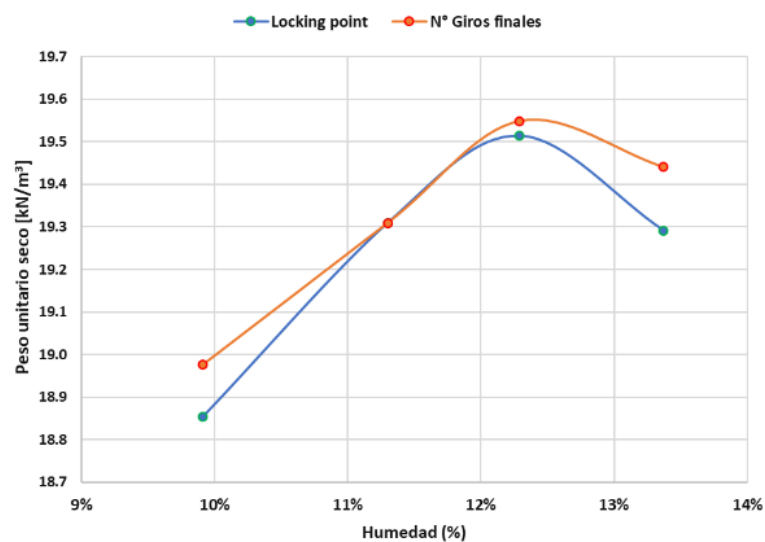
(b) MGM9

Se evidencia en la figura 6(a) que para el material MGM6, con una humedad de 11.79% se alcanza un mayor peso unitario seco, además, con la menor humedad (9.41%) se obtienen los menores pesos unitarios seco. De igual forma, en la figura 6(b) se observa que para el material MGM9, se alcanza un mayor peso unitario seco con una humedad de 12.22% y con la humedad mínima (10.38%) se obtiene menor densidad seca.

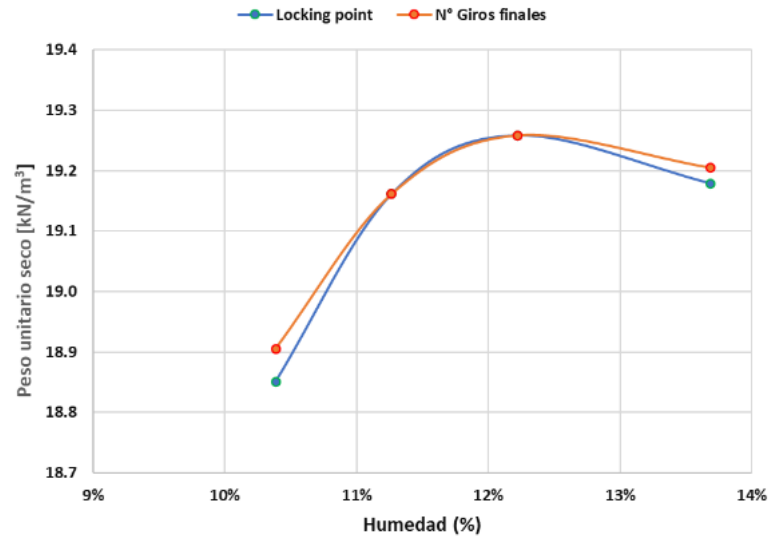
En la figura 7 se presentan las curvas de compactación para los materiales MGM6 y MGM9. Como se muestra en la figura 7(a), para el material MGM6, se tiene una humedad óptima de 11.9%, con la cual se alcanza un peso unitario seco de 19.56 kN/m<sup>3</sup>. Por su parte, como se observa en la figura 7(b), para el material MGM9 se tiene una humedad óptima de 12.35%, con la cual se alcanza un peso unitario seco de 19.26 kN/m<sup>3</sup>. Con los datos obtenidos de la compactación de los dos materiales, se observa que la humedad óptima del MGM6 es menor, pero este alcanza un mayor peso unitario comparado con el MGM9.

## Figura 7

*Curvas de compactación para los materiales MGM6 y MGM9.*



(a) MGM6



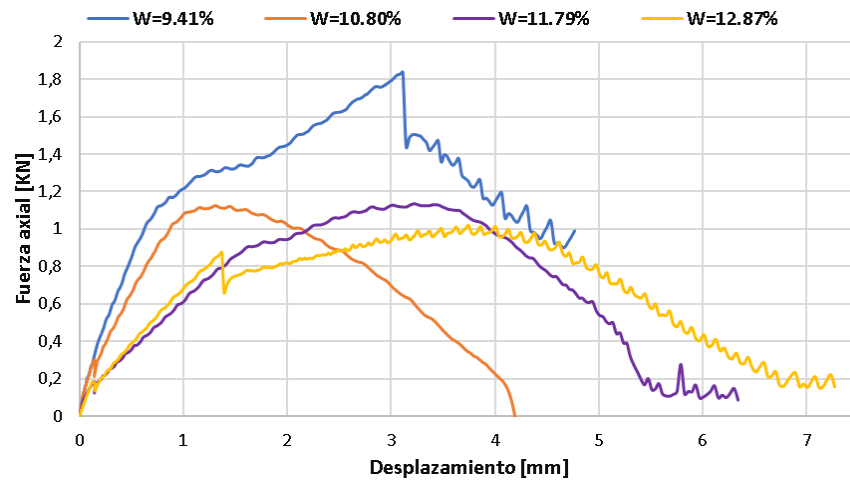
(b) MGM9

#### 5.4 Tracción indirecta

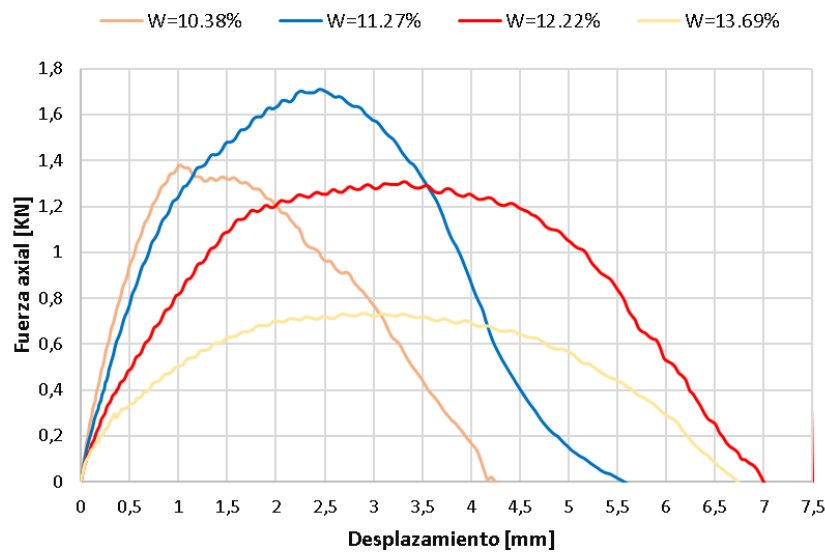
En la figura 8 se presentan los resultados obtenidos del ensayo de tracción indirecta realizado a los materiales MGM6 y MGM9. Como se evidencia en la figura 8(a), en las muestras del material MGM6 la máxima fuerza axial que soporta una probeta tiende a disminuir a medida que aumenta la humedad. Por su parte, en la figura 8(b), se muestra que en el material MGM9, la máxima fuerza axial se presentó en la probeta con humedad de 11.27%, pero, no se observa una tendencia clara entre el contenido de humedad y la resistencia a la tracción indirecta.

**Figura 8**

*Fuerza axial vs desplazamiento para los materiales MGM6 y MGM9.*



(a) MGM6

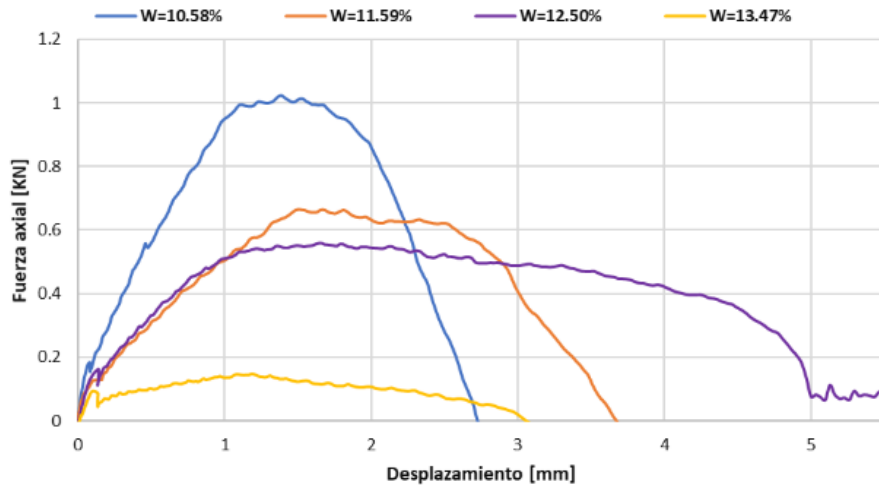


(b) MGM9

En la figura 9 se presentan los resultados obtenidos del ensayo de tracción indirecta realizado al material SBG\_C1. Se puede observar que, a mayor humedad presente en la probeta, la resistencia a tracción tiende a disminuir.

**Figura 9**

*Fuerza axial vs desplazamiento para el material SBG\_C1.*



Nota. Tomado de Garzón, Sánchez. 2022. Evaluación del comportamiento hidromecánico de materiales granulares marginales de subbase identificados como MGM-3 y SBG\_C1.

En la tabla 7 se presentan los resultados obtenidos de la resistencia a la tracción indirecta para las probetas de MGM6 y MGM9. La resistencia máxima a la tracción indirecta para el material MGM6 fue de 0.0370 N/mm<sup>2</sup> y se presentó en la probeta con menor humedad (9.41%); en las probetas con mayor humedad se evidencia una disminución significativa de esta resistencia. Para el material MGM9, la máxima resistencia a la tracción indirecta se dio en la probeta que presentaba humedad de 11.27%, con un valor de 0.035 N/mm<sup>2</sup>. Por otra parte, la resistencia a la compresión mínima fue de 0.021 N/mm<sup>2</sup> y se presentó en la probeta con humedad de 13.69%.

**Tabla 7**

*Resistencia a la tracción indirecta para los materiales MGM6 y MGM9.*

Probeta	Humedad (%)	Carga Max de Rotura [N]	Altura [mm]	Diametro [mm]	RTI [N/mm <sup>2</sup> ]
MGM6-C1	9.41	1835.6	210.83	150	0.0370
MGM6-C2	10.80	1125.5	206.99	150	0.0231
MGM6-C3	11.79	1137.7	204.36	150	0.0236
MGM6-C4	12.87	1018.7	205.64	150	0.0210
MGM9-C1	10.38	1380.7	210.1	150	0.0279
MGM9-C2	11.27	1708.2	207.72	150	0.0349
MGM9-C3	12.22	1308.7	206.62	150	0.0269
MGM9-C4	13.69	733.4	205.98	150	0.0151

En la tabla 8, se presentan los resultados obtenidos de la RTI para las probetas de material SBG\_C1. La resistencia máxima a la tracción indirecta para el material SBG\_C1, fue de 0.0219 N/mm<sup>2</sup> y se presentó en la probeta con menor humedad (10.58%).

**Tabla 8**

*Resistencia a la tracción indirecta para el material SBG\_C1.*

Probeta	Humedad (%)	R <sub>t</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]
SBG_C1-C1	10.58	0.0219
SBG_C1-C2	11.59	0.0142
SBG_C1-C3	12.5	0.0114
SBG_C1-C4	13.47	0.0031

Nota. Tomado de Garzón, Sánchez. 2022.

Para los materiales de estudio, en comparación con la SBG\_C1 se evidencia que el material MGM6 presenta la misma tendencia a disminuir tanto la resistencia a fuerza axial como la RTI al aumentar la humedad presente en la probeta. Por su parte, el material MGM9 presenta un valor atípico en la humedad de 11.27%; independiente a este valor, los demás resultados obedecen la tendencia ya mencionada. Por otra parte, en general la RTI de los materiales MGM6 y MGM9 es mayor a la presentada por el material SBG\_C1.

### 5.5 Toma de imágenes

Durante la ejecución de los ensayos desarrollados en el proyecto de investigación, se realizó un registro fotográfico. En la figura 10, se muestran las diferentes imágenes tomadas a la probeta de material MGM9-C1. En las figuras 10(a) y 10(b) se observa la cara superior y lateral, respectivamente, de la probeta antes de realizar el ensayo de tracción indirecta. En la figura 10(c), se presenta la fotografía de la superficie de falla, donde se pueden apreciar los diferentes agregados que componen la probeta; igualmente, en la figura 10(d), se muestra una imagen 3D correspondiente a la superficie de falla.

#### Figura 10

*Registro fotográfico para la probeta de material MGM9-C1.*



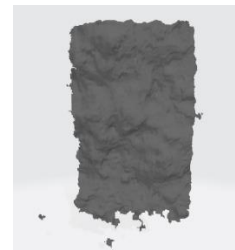
(a) *Capa superior*



(b) *Cara lateral*



(c) *Capa superior*



(d) *Cara lateral*

Las mismas imágenes presentadas en la figura 10 se tomaron para todas las probetas usadas en la ejecución del proyecto.

## 5.6 Succión

Con el fin de obtener la succión de cada MGM se determinó la masa del papel de filtro seco y la masa del papel de filtro húmedo. Seguidamente se calculó el contenido de agua del papel filtro. Con la curva de calibración del papel filtro Whatman N°42 (ASTM D5298) (ASTM, 2003) y el porcentaje de humedad presente en el papel ( $W_f$ ) se calculó el valor de succión total. En la tabla 9, se muestran los valores registrados en laboratorio y la humedad calculada para los dos materiales de estudio.

**Tabla 9**

*Valores de parámetros necesarios para calcular el valor de succión para los materiales MGM-6 y MGM-9.*

Probeta	M1 (g)	Tc (g)	M2 (g)	Th (g)	Mf (g)	Mw (g)	Wf (%)
MGM-6-C1	2.3282	1.9810	2.2961	2.0867	0.2094	0.1378	65.8071
MGM-6-C2	2.3184	2.0041	2.3040	2.0687	0.2353	0.0790	33.5742
MGM-6-C3	2.2981	1.9687	2.3468	2.0981	0.2487	0.0807	32.4487
MGM-6-C4	2.2791	1.9625	2.3167	2.0918	0.2249	0.0917	40.7737
MGM-9-C1	2.4866	2.1935	2.3387	2.1118	0.2269	0.0662	29.1758
MGM-9-C2	2.5739	2.2133	2.4213	2.1922	0.2291	0.1315	57.3985
MGM-9-C3	2.4288	2.1390	2.3609	2.1624	0.1985	0.0913	45.9950
MGM-9-C4	2.5278	2.2133	2.4159	2.2135	0.2024	0.1121	55.3854

Los valores de succión (h) calculados se presentan en la tabla 10 para los materiales MGM6 y MGM9.

**Tabla 10**

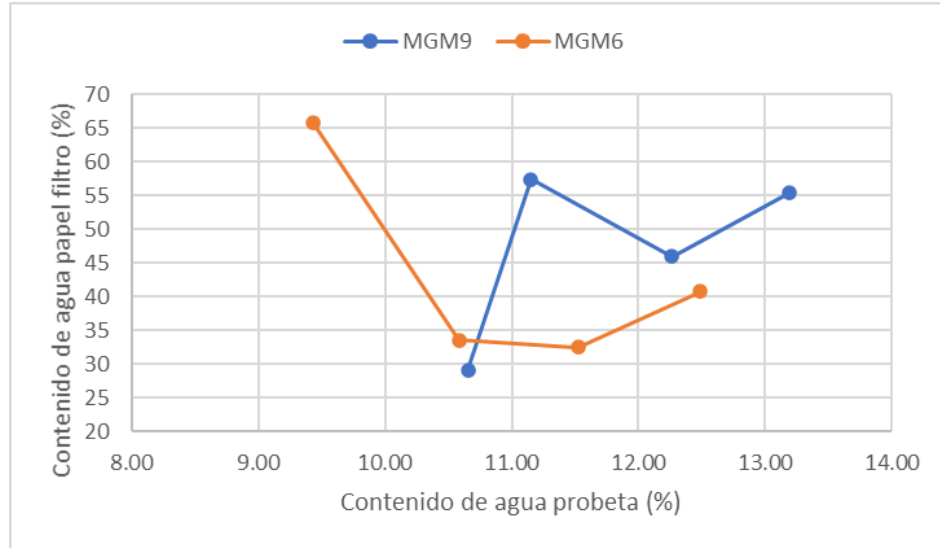
*Resultados medición de succión de los materiales MGM-6 y MGM-9.*

Probeta	Wf (%)	m(log10 kPa/%)	b (log10 kPa)	h (log10 kPa)	Succión (kPa)
MGM-6-C1	65.8071	-0.0779	5.3270	0.2006	1.59
MGM-6-C2	33.5742	-0.0779	5.3270	2.7116	514.72
MGM-6-C3	32.4487	-0.0779	5.3270	2.7992	629.86
MGM-6-C4	40.7737	-0.0779	5.3270	2.1507	141.49
MGM-9-C1	29.1758	-0.0779	5.3270	3.0542	1132.93
MGM-9-C2	57.3985	-0.0135	2.4120	1.6371	43.36
MGM-9-C3	45.9950	-0.0135	2.4120	1.7911	61.81
MGM-9-C4	55.3854	-0.0135	2.4120	1.6643	46.16

En la tabla 10, se muestra como la succión total disminuye cuando aumenta la humedad absorbida por el papel de filtro, lo cual indica que son inversamente proporcionales. Además, se evidencia como en algunos valores atípicos (probetas MGM6-C1, MGM6-C2, y MGM9-C2), los contenidos de humedad del papel filtro no guardan la tendencia del contenido de humedad de la probeta, esto debido a posibles fallas en el protocolo de ensayo, estos se identifica en la figura 11, donde se muestra gráficamente la relación entre el contenido de humedad presente en a probeta y el contenido de humedad presente en el papel de filtro, dicha relación no cumple con la expectativa teórica, pues se esperaría que a medida que aumente el contenido de humedad de las probetas, también lo haga el contenido de humedad de los papeles filtros.

**Figura 11**

*Relación humedad de probeta y contenido de humedad del papel de filtro.*



En la tabla 11, se presentan los valores calculados de succión (h) para el material SBG\_C1, los cuales se incluyen en la figura 11.

**Tabla 11**

*Resultados medición de succión del material SBG\_C1.*

Probeta	Wf (%)	m(log10 kpa/%)	b (log10 kpa/%)	h (log10 kpa)	Succión (kPa)
SBG_C1-C1	67.8540	-0.0135	2.4120	1.4960	31.3308
SBG_C1-C2	29.7199	-0.0135	2.4120	2.0108	102.5135
SBG_C1-C3	46.7012	-0.0135	2.4120	1.7815	60.4692
SBG_C1-C4	44.3094	-0.0779	5.3270	1.8753	75.0404

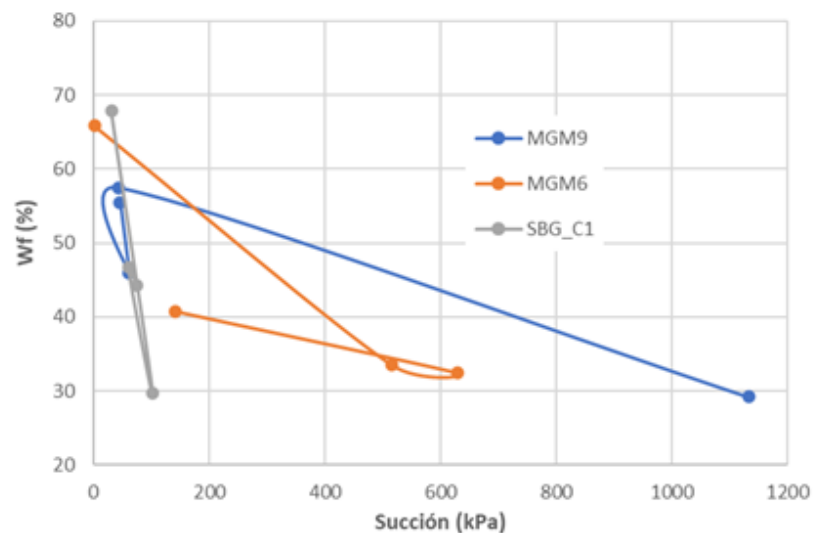
Nota. Tomado de Garzón, Sánchez. 2022.

En la figura 12, se presentan las curvas de retención de humedad para los materiales MGM6, MGM9, y SBG\_C1. Se evidencia que el material SBG\_C1 el cual está compuesto en mayor proporción por arena que los materiales MGM6 y MGM9, y en menor proporción de

material fino (pasa tamiz No. 200), presentó inicialmente un mayor contenido de agua y valores bajos de succión. Por su parte, los materiales MGM6 y MGM9, los cuales presentan un mayor contenido de finos (21% y 24%, respectivamente) demostraron mayor succión total y menor contenido inicial de humedad. De lo expuesto, se puede evidenciar la influencia del material fino (pasa tamiz No. 200), el cual genera que las muestras que más los contienen, desarrollen succiones altas, incluso con contenidos de humedad considerable.

### Figura 12

*Curvas de retención de agua para los materiales MGM6 y MGM9.*



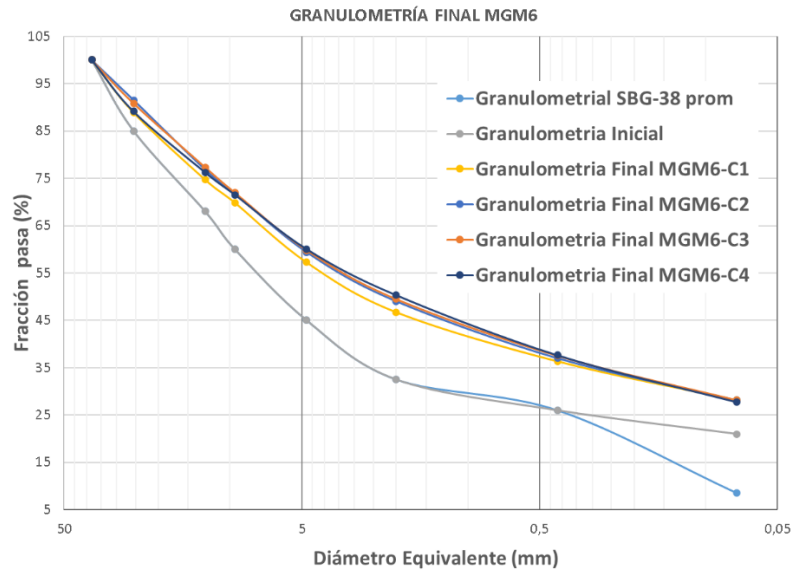
### 5.7 Granulometría final

En las figuras 13 y 14 se presenta la comparación gráfica de granulometrías original y final de los materiales MGM6 y MGM9, respectivamente, incluyendo los datos de cada probeta usada en la curva de compactación. La fracción que presenta un mayor cambio con respecto a la granulometría original es el porcentaje que pasa por el tamiz de 2 mm (tamiz No. 10), con una

diferencia promedio del 16.5%. Este cambio se presenta en todas las curvas de granulometría de las probetas de prueba.

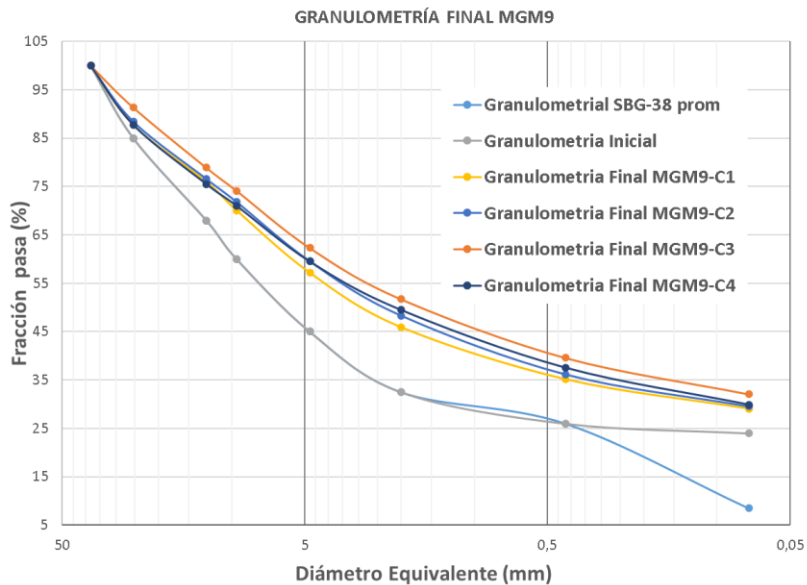
**Figura 13**

*Granulometría inicial y final del material MGM6.*



**Figura 14**

*Granulometría inicial y final del material MGM9.*



Se evidencia que la probeta MGM9-C3, que tiene mayor densidad como se muestra en el ítem 5.3, presenta igualmente mayor variación en la granulometría final respecto a la inicial. Esto se debe principalmente a la aplicación de los esfuerzos de compactación que desencadena la degradación del agregado.

La diferencia en el porcentaje de finos entre la granulometría inicial y final para los materiales MGM6 y MGM9, no se debe completamente a la fracturación del material, puesto que a la granulometría inicial no se realizó lavado, por lo cual no se asegura que en el material granular no hubiese partículas finas adheridas.

## **6. Conclusiones**

El presente estudio evaluó el comportamiento hidromecánico de muestras compactadas con materiales MGM6 y MGM9. A partir de los resultados obtenidos de cada ensayo realizado durante el desarrollo del proyecto, se presentan las conclusiones enunciadas a continuación.

Se estimó el valor de la resistencia a la tracción indirecta de las probetas y se encontró que, a mayor contenido de humedad de compactación, menor es la resistencia a la tracción indirecta. Esta influencia del contenido de humedad de compactación sobre la resistencia a la tracción indirecta se refleja en los materiales SBG\_C1 y MGM6 al igual que en el material MGM9 exceptuando un valor considerado atípico.

Se encontró una respuesta positiva en la resistencia a la tracción indirecta por parte de los materiales MGM6 y MGM9 en comparación con la respuesta del material de control SBG\_C1, teniendo en cuenta que los valores de RTI mostrados por los MGMs son considerablemente mayores a los presentados por el material de control SBG\_C1. Estos resultados preliminarmente

sugieren que en términos de la RTI los MGMs podrían ser empleados en capas de subbase en pavimentos para vías terciarias.

Según las expectativas teóricas, no fue posible establecer una relación clara entre la succión total y el contenido de agua presente en la probeta. Por otra parte, fue posible establecer que a mayor contenido de finos presentes en los materiales MGMs la succión total se incrementó. Los valores de succión total presentados por los MGMs son mayores respecto a los que presenta el material de control SBG\_C1; esto sugiere la necesidad de ahondar, a partir de investigación futura, en la cuantificación del efecto de la succión en los materiales MGMs para su adecuada concepción como materiales de subbase en estructuras de pavimento.

Por último, los materiales estudiados (MGM6 y MGM9) se degradaron por acción principal de la compactación (método giratorio), y en menor medida por el proceso de mezclado mecánico y la aplicación de carga en el ensayo de tracción indirecta. Esto se evidencia en los cambios de granulometría de cada material MGM respecto a la granulometría de diseño, donde se evidenció una disminución de las proporciones de gravas y un aumento de las proporciones de arenas y finos. El contenido de finos en la granulometría final no se debe únicamente a la degradación de los agregados, ya que inicialmente había una porción desconocida de estos adheridos al material granular, los cuales en la granulometría final fueron eliminados en su totalidad por el método de lavado.

## **7. Recomendaciones**

Para dar continuación a la investigación referente a la implementación de los MGMs para capas de subbases de vías terciarias, se recomienda:

Realizar el ensayo triaxial dinámico, con el objetivo de establecer la influencia del índice de plasticidad y el contenido de finos en el módulo resiliente de los MGMs, y

En caso de emplearse los materiales estudiados en este documento en capas de subbases de vías terciarias, se hace necesario la implementación de un manejo de drenaje eficiente.

En futuras mediciones de succión, se recomienda mejorar las condiciones de aislamiento de la muestra, utilizar varias capas de sellado, además, almacenar muestras secas y muestras húmedas en cavas diferentes.

### Referencias Bibliográficas

- A. Ezaoui, T. Lecompte, H. Di Benedetto, E. Garcia, “Effects of various loading stress paths on the stress-strain properties and on crushability of an industrial soft granular material”, *Granular Matter.*, 13 (4), 283–301, 2011.
- Alvarez, A., Mora, J., & Espinosa, L. (2018). Quantification of stone-on-stone contact in permeable friction course mixtures based on image analysis. *Construction and Building Materials*, 165, 462-471.
- ASTM. Standard test method for the measurement of soil potential (suction) using filter paper. D5298–10. Philadelphia, U.S. American Society for Testing and Materials, 2003
- Bejar Pulido, Silvia Janeth, Cantú Silva, Israel, Yáñez Díaz, María Inés, & Luna Robles, Erik Orlando. (2020). Curvas de retención de humedad y modelos de pedotransferencia en un Andosol bajo distintos usos de suelo. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 11(59), 31-50. Epub 15 de julio de 2020.
- Berthelot, C., Podborochynski, D., Marjerison, B., & Saarenketo, T. (2010). Caracterización de materiales base granulares marginales estabilizados con cemento para la construcción de carreteras. *Artículo académico*, 37(12) 1613-1620.
- Botía, W. (2015). *MANUAL DE PROCEDIMIENTOS DE ENSAYOS DE SUELOS Y MEMORIA DE CÁLCULO*. Unimilitar,
- Cano, H.,Perucho; A. (2015) Experiencias de utilización de materiales marginales y especiales en terraplenes viarios en España.
- CONPES 3857. (2016). Lineamientos de política para la gestión de la red terciaria.
- Correa Valderrama, E (2017). El rol de las vías terciarias en la construcción de un nuevo país.

DNP (2020). Mejoramiento de vías terciarias - vías de tercer orden. Proyecto tipo, (2), 11-13.

INVIAS (2008). Manual de diseño geométrico de carreteras. ECOE ediciones, 5 - 8.

INVIAS, I. N. (2013). Especificaciones Generales de Construcción de carreteras. INV  
ARTICULO220-13, TERRAPLENES.

INVIAS. (2013). Determinación de la succión de un suelo usando papel de filtro. Normas de  
ensayos de materiales para carreteras E-159.

INVIAS. (2013). Sub-base granular. Especificaciones generales de construcción de carreteras, Art.  
320.

L. Ortiz, A. Batista, (2013) Estudio del fenómeno del crushing en el ensayo de compactación de  
un proctor normal. Tesis de Pregrado, Universidad Católica de Colombia.

Meza Ochoa, Victoria Elena (2012). SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS, DE LA  
INVESTIGACIÓN A LA CÁTEDRA UNIVERSITARIA. Boletín de Ciencias de la  
Tierra, (31),23-38.

Microsoft Kinect for Windows SDK v1.8  
<https://www.microsoft.com/enus/download/details.aspx?id=40278>.

Nakao, T., & Fityus, S. (2008). Prueba de corte directo de un material marginal usando una cajade  
corte grande. Artículo académico, 31(5), 393-403.

Neville, A. M.: Properties of Concrete, John Wiley & Sons, Inc., London (1996), p. 844.

NLT-346/90 “Resistencia a compresión diametral (ensayo brasileño) de mezclas bituminosas”

Pérez, F., Martínez, A., Miró, R., Hernández, D., & Araya, L. (2014). Effect of compaction  
temperature and procedure on the design of asphalt mixtures using Marshall and gyratory  
compactors. Construction and Building Materials, 65, p. 264-269

Popov, E. (1990). Engineering mechanics of solids. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.

Pretel, G. B. (2002). PG-3 Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes. Ediciones Liteam SL.

Revista de ingeniería, (45), 64-71.

Roymar Alberto Gelves Galvis. 2022. Trabajo de grado para optar por el título de magister en geotecnia.

Umbarila, J., Rodríguez, J. (S.F.). Obtención de la curva de retención de agua en suelos caoliníticos con mixturas de óxido de hierro usando los métodos del papel filtro y placa de succión. Unipiloto.

### Apéndices

**Apéndice A.** Registro fotográfico realizado durante el desarrollo del proyecto.

En la figura 1, se muestran los resultados obtenidos del registro fotográfico tomado a la probeta MGM6-C1.



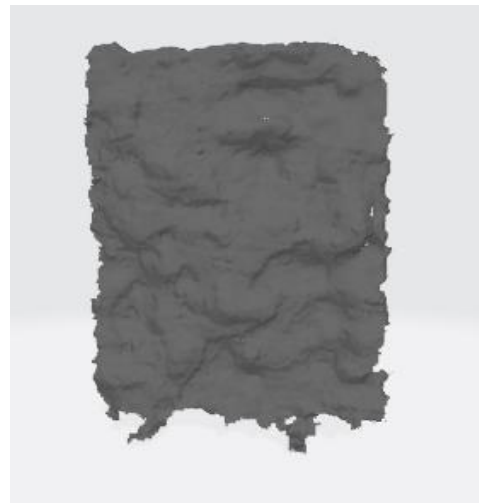
(a) MGM6-C1-Cara Lateral



(b) MGM6-C1-Cara Superior



(c) MGM6-C1-Superficie de Falla



(d) MGM6-C1-Superficie de Falla 3D

**Figura 1.** Imágenes de la cara lateral, cara superior, superficie de falla, y superficie de falla en 3D para la probeta MGM6-C1.

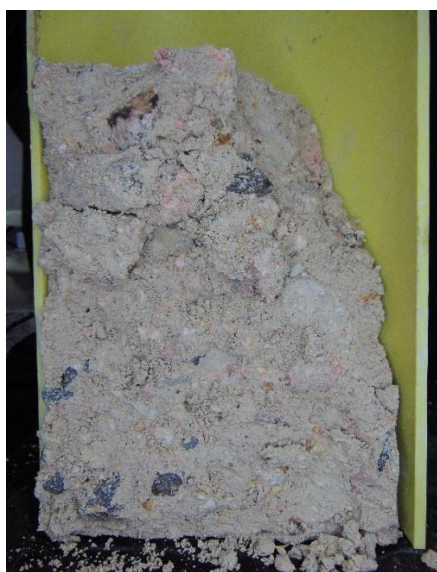
En la figura 49, se muestran los resultados obtenidos del registro fotográfico tomado a la probeta MGM6-C2



(a) MGM6-C2-Cara Lateral



(b) MGM6-C2-Cara Superior



(c) MGM6-C2-Superficie de Falla



(d) MGM6-C2-Superficie de Falla 3D

**Figura 2.** *Imágenes de la cara lateral, cara superior, superficie de falla, y superficie de falla en 3D para la probeta MGM6-C2.*

En la figura 50, se muestran los resultados obtenidos del registro fotográfico tomado a la probeta MGM6-C3



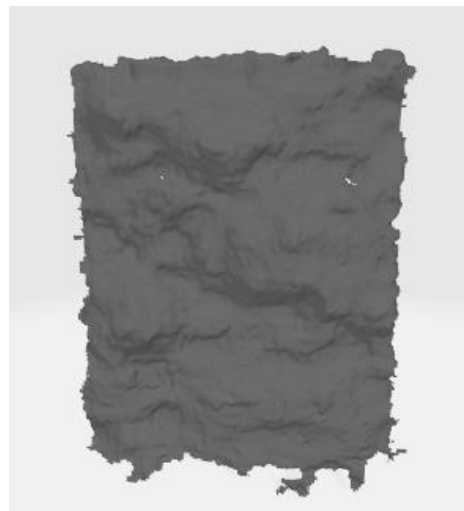
(a) MGM6-C3-Cara Lateral



(b) MGM6-C3-Cara Superior



(c) MGM6-C3-Superficie de Falla



(d) MGM6-C3-Superficie de Falla 3D

**Figura 3.** Imágenes de la cara lateral, cara superior, superficie de falla, y superficie de falla en 3D para la probeta MGM6-C3.

En la figura 4, se muestran los resultados obtenidos del registro fotográfico tomado a la probeta MGM6-C4



(a) MGM6-C4-Cara Lateral



(b) MGM6-C4-Cara Superior



(c) MGM6-C4-Superficie de Falla



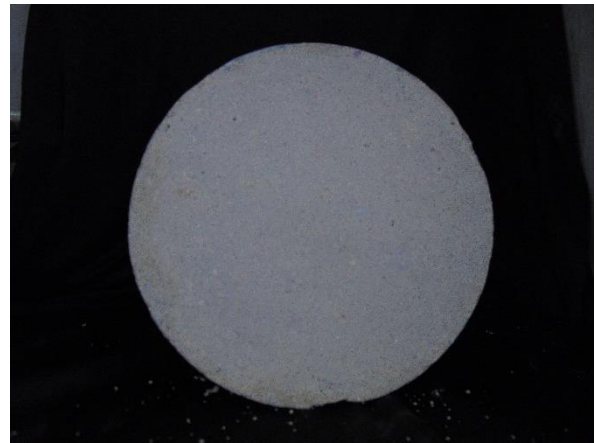
(d) MGM6-C4-Superficie de Falla 3D

**Figura 4.** Imágenes de la cara lateral, cara superior, superficie de falla, y superficie de falla en 3D para la probeta MGM6-C4.

En la figura 52, se muestran los resultados obtenidos del registro fotográfico tomado a la probeta MGM9-C1.



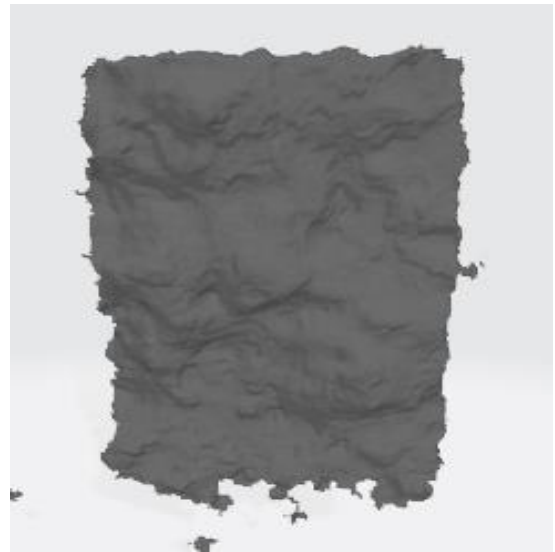
(a) MGM9-C1-Cara Lateral



(b) MGM9-C1-Cara Superior



(c) MGM9-C1-Superficie de Falla



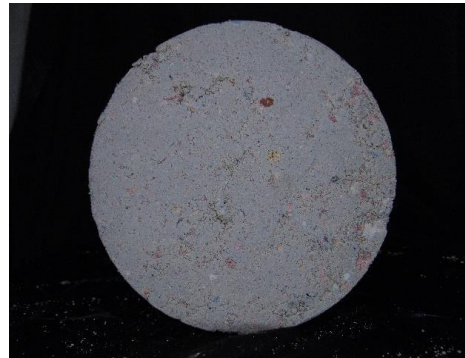
(d) MGM9-C1-Superficie de Falla 3D

**Figura 5.** Imágenes de la cara lateral, cara superior, superficie de falla, superficie de falla en 3D para la probeta MGM9-C1.

En la figura 53, se muestran los resultados obtenidos del registro fotográfico tomado a la probeta MGM9-C2.



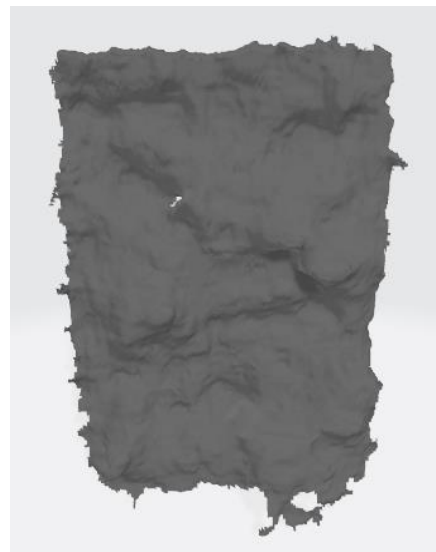
(a) MGM9-C2-Cara Lateral



(b) MGM9-C2-Cara Superior



(c) MGM9-C2-Superficie de Falla



(d) MGM9-C2-Superficie de Falla 3D

**Figura 6.** *Imágenes de la cara lateral, cara superior, superficie de falla, superficie de falla en 3D para la probeta MGM9-C2.*

En la figura 7, se muestran los resultados obtenidos del registro fotográfico tomado a la probeta MGM9-C3.



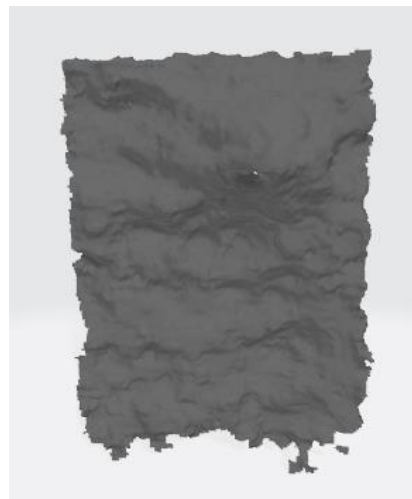
(a) MGM9-C3-Cara Lateral



(b) MGM9-C3-Cara Superior



(c) MGM9-C3-Superficie de Falla



(d) MGM9-C3-Superficie de Falla 3D

**Figura 7.** Imágenes de la cara lateral, cara superior, superficie de falla, superficie de falla en 3D para la probeta MGM9-C3.

En la figura 8, se muestran los resultados obtenidos del registro fotográfico tomado a la probeta MGM9-C4.



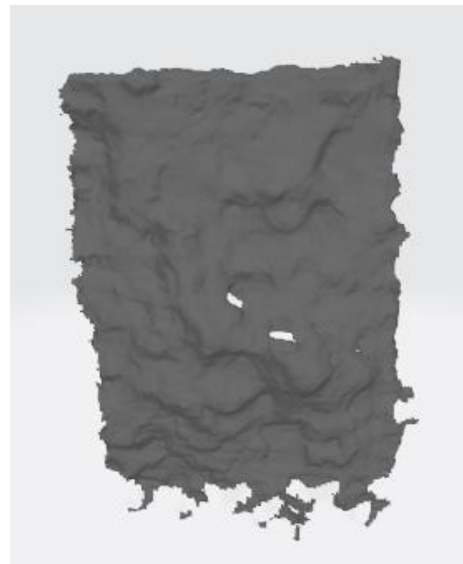
(a) MGM9-C4-Cara Lateral



(b) MGM9-C4-Cara Superior



(c) MGM9-C4-Superficie de Falla



(d) MGM9-C4-Superficie de Falla 3D

**Figura 8.** Imágenes de la cara lateral, cara superior, superficie de falla, superficie de falla en 3D para la probeta MGM9-C4.

**Apéndice B. Protocolo de ensayo de tracción indirecta****PROTOCOLO ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA SOBRE PROBETAS DE SUELO COMPACTADO****1. DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO**

El ensayo tiene como objetivo determinar la resistencia a la tracción indirecta de probetas cilíndricas de suelo compactado someténdolas a una fuerza de compresión aplicada en una banda estrecha en toda su longitud [1]. En consecuencia, el resultado de la fuerza provoca un esfuerzo de tracción relativamente uniforme en todo el diámetro del plano de carga vertical, y esta tracción conlleva a la falla de la probeta y desencadena la rotura en el plano diametral [1].

**2. APARATOS Y MATERIALES NECESARIOS**

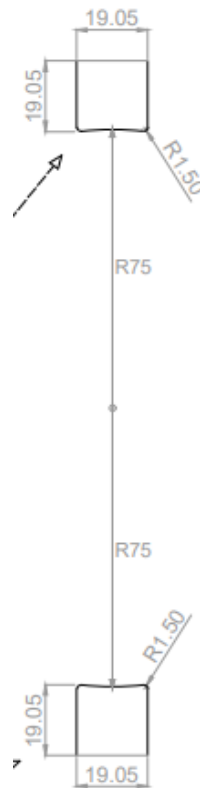
**2.1. Prensa:** Para ensayar las probetas se empleará cualquier tipo de prensa de compresión mecánica o hidráulica, que pueda proporcionar durante la aplicación de la carga una velocidad uniforme de desplazamiento del sistema de carga de  $0,85 \pm 0,02$  mm/s (50,8 mm/min) [1]. En la figura 1, se presenta la prensa MTS 647 hydraulic wedge grip precisión, la cual, fue usada para ese ensayo, esta puede proporcionar una carga máxima en situación estática de 31 kN.



*Figura 1. Prensa MTS 647.*

**2.2. Calibrador.** Para medir con precisión de  $\pm 0,1$  mm el diámetro y la altura de las probetas para ensayo.

**2.3. Dispositivo de sujeción de la probeta (cabezal de carga).** El dispositivo permitirá la sujeción de la probeta, utilizando dos tornillos de ajuste, así como la colocación de la probeta, de forma que dos de sus generatrices, diametralmente opuestas, estén contenidas en el plano diametral perpendicular a los platos de la prensa [1]. El contacto de estas dos generatrices con los elementos transmisores de la carga se hace por medio de dos bandas de apoyo de acero de 250 mm de longitud, 19.05 mm de espesor y 19.05 mm de ancho donde la cara de contacto con la probeta tiene un radio de curvatura igual al radio nominal de la probeta. En la figura 2, se presenta el detalle de las bandas trasmisoras de carga.



*Figura 2.* Vista frontal bandas de apoyo de probeta.

**Tubo PVC:** En la figura 3, se muestra el tubo de recolección que será de 15 cm de diámetro y estará cortado de forma longitudinal por el centro, se usará para la recolección de la probeta una vez haya fallado.



*Figura 3.* Tubo de PVC

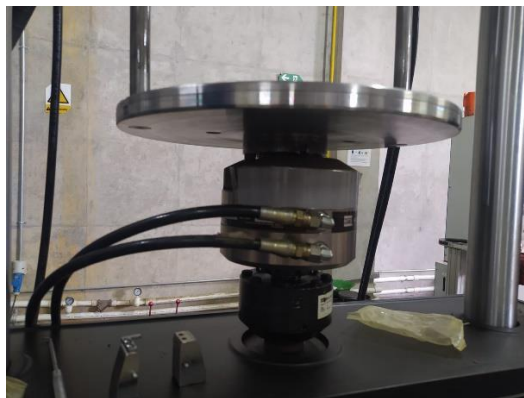
**2.4. Cava de icopor; papel vinipel:** Para el almacenamiento de las muestras antes del ensayo, evitando la pérdida de humedad y material granular.

**2.5. CD:** Para extraer los datos obtenidos de la MTS 647.

### 3. PROCEDIMIENTO

**3.1.** Probetas para el ensayo: características y preparación. El ensayo se realizará sobre probetas cilíndricas fabricadas en laboratorio mediante el método de compactación giratoria. Las probetas tienen un diámetro de 150 mm y una altura de aproximadamente 220 mm.

**3.2.** Montaje dispositivo de sujeción de la probeta (cabezal de carga): se sujetan la cuña ubicada en la parte inferior del cabezal de carga con la mordaza de la MTS 647 como se muestra en la figura 4, asegurándose de que su agarre sea fijo y no haya desplazamiento.



*Figura 4.* Montaje cabezal de carga.

- 3.3.** Se saca la probeta de la cava de icopor, seguidamente se le quita el papel vinipel teniendo el máximo cuidado para no perder material. Todo el proceso se debe realizar con guantes quirúrgicos.
- 3.4.** Se coloca la probeta sobre los elementos transmisores de carga del cabezal (bandas de apoyo).
- 3.4.1.** Para asegurarse que la probeta esté totalmente centrada, se hacen marcas en el centro de esta, que servirán como guías a la hora de colocar la probeta. En la figura 5, se muestran las marcas realizadas a la probeta.



*Figura 5. Marcas guía.*

- 3.4.2.** Durante el ensayo debe asegurarse que la probeta permanece centrada cuando comience la carga y durante la aplicación de esta el plato superior ha de estar paralelo al inferior.
- 3.5.** En la figura 6, se ilustra como se ubican los tubos PVC de recolección, de forma que cuando la probeta falle, el material caiga sobre estos.



*Figura 6.* Ubicación tubos de PVC.

- 3.6.** Se ubica entre la mordaza y el cabezal una base de goma, la cual se encarga de transmitir la carga de forma homogénea en el área de contacto, como se muestra en la figura 7.



*Figura 7.* Base de goma transmisión de carga.

Se aplica la carga a la probeta manteniendo la velocidad de deformación de  $0,85 \pm 0,02$  mm/s (50,8 mm/min) constante [1], hasta que la probeta falle.

- 3.7.** Durante la aplicación de la carga el software de la MTS-67 registra los valores de carga de rotura y deformación horizontal, una vez finalizado el ensayo se extraen los datos al CD.
- 3.8.** Se extraen los tubos recolectores con el material
- 3.9.** Se selecciona una muestra representativa de 200 a 400 g del material a la cual se le medirá succión.
- 3.10.** El material restante se guarda para posteriormente realizarle el ensayo de granulometría.

#### 4. RESULTADOS

La resistencia a compresión diametral, tracción indirecta de una probeta, se calcula con la ecuación 1, aproximando a la primera cifra decimal.

$$RTI = \frac{2P}{\pi h d} \quad (1)$$

Donde:

**RTI** = Resistencia a tracción indirecta, (N/mm<sup>2</sup>).

**P** = Carga máxima de rotura, N.

**$\pi$**  = Constante 3,14159...

**h** = Altura de la probeta, mm.

**d** = Diámetro de la probeta, mm.

#### REFERENCIAS

[1] NLT-346/90 “Resistencia a compresión diametral (ensayo brasileño) de mezclas bituminosas”.

**Apéndice C.** Video ensayo de tracción indirecta.

**Apéndice D.** Video tiempos de mezclado.

Los apéndices C y D están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS.